

## 縦置き I 形鋼格子床版を用いた連続合成桁の負曲げ実験 Negative bending tests of continuous composite girder with grating slab arraying I-beams longitudinally

○高 龍\* 梶田 順一\*\* 櫻井 信彰\*\*\* 七浦 恒康\*\*\*\* 松井 繁之\*\*\*\*\*  
Ryu KOH Nobukazu KAJITA Nobuaki SAKURAI  
Tsuneyasu NANAURA Shigeyuki MATSUI

**ABSTRACT** Crack width control of the slab on the intermediate support is important at a continuous composite girder bridge. This paper reports the crack control of a grating slab arraying I-beams longitudinal direction and taking spans the intervals of cross beams. As the grating slab is presumed to have low bond performance between I-beams and concrete, longitudinal reinforcements are arranged in the upper part of slab to decrease crack width. To confirm the effect, a static loading tests giving negative bending moment is carried out. Based on the test results, a crack control design method is proposed.

**Keywords** : 鋼合成桁, 縦置き I 形鋼格子床版, 静的負曲げ載荷実験, ひび割れ幅制御  
Composite girder, grating slab arraying I-beams longitudinally,  
static loading tests of negative bending, crack width control

### 1. はじめに

連続合成桁においては、中間支点上の床版のひび割れ幅制御が重要であり、これに関し RC 床版や合成床版を対象として幾つかの実験が報告されている<sup>1)~3)</sup>。これらはどれも床版支間が主桁に直交する方向であるが、主桁方向を支間とする縦置き I 形鋼格子床版の連続桁への適用実績が近年とくに増加しており、設計実績は 20 橋を、竣工は 10 橋を超えている。この床版形式では、主体の I 形鋼のコンクリートとの付着性能が低いため、ひび割れ制御用に上面に縦・横に異形鉄筋を配置している(図-1)。その効果の確認のために実物大の床版模型を用いて合成桁の静的負曲げ実験を行った。この結果を他の床版の静的負曲げ実験結果と比較して、本床版の連続合成桁への適用性を確認し、併せてひび割れ幅制御設計について検討した。本稿では、これら実験及び検討結果について報告するものである。

### 2. 負曲げ実験概要

#### 2.1 実験供試体

過去の合成床版の負曲げ実験<sup>1)</sup>の供試体を参考に、本実験の供試体を次のよう作成した。

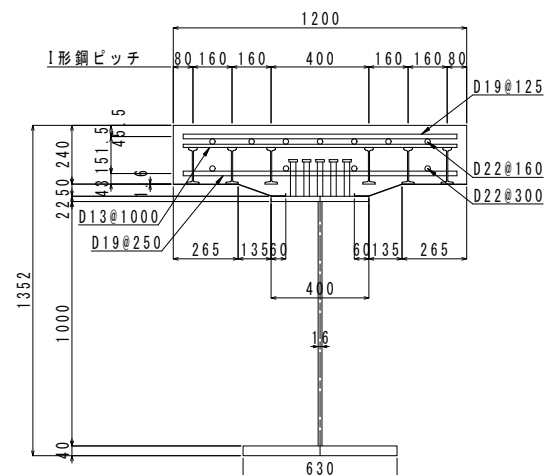


図-1 供試体断面図

- \* 新日本技研(株) 設計部・設計主幹(〒733-0013 広島市西区横川新町 13-1)  
\*\*工修 新日本技研(株) 技術本部・技術本部長(〒105-0014 東京都港区芝 2-1-23)  
\*\*\* 新日鉄エンジニアリング(株) 構造商品開発室・室長(〒293-0011 千葉県富津市新富 20-1)  
\*\*\*\*工修 新日鉄エンジニアリング(株) 橋梁商品室・マネジャー(〒141-8604 東京都品川区大崎 1-5-1)  
\*\*\*\*\*工博 大阪工業大学・特任教授(〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4 番地) 第 2 種正会員

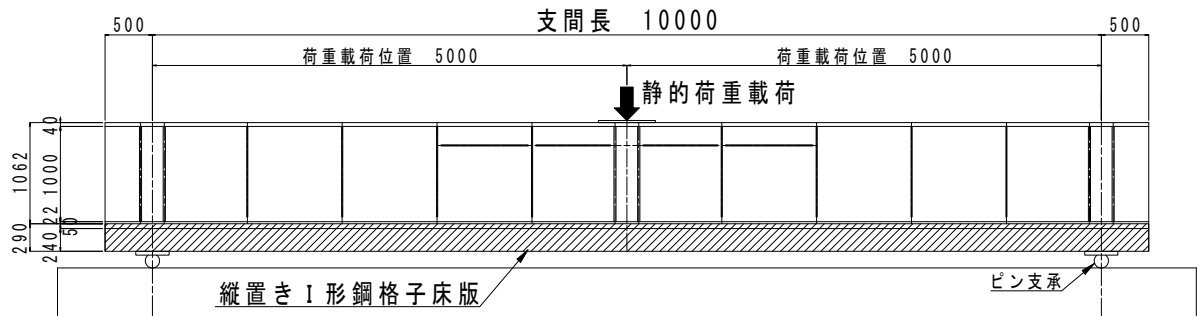


図-2 供試体側面図



写真-1 実験状況

供試体は、縦置き I 形鋼格子床版(床版支間は橋軸方向で 4.0m 程度)を用いた連続合成桁の中間支点前後 10.0m に着目しモデル化した。床版の厚さ 240mm、幅 1200mm とし、桁高 1000mm の鋼桁とを頭付きスタッドにより結合した。I 形鋼の高さは 150mm であり、ひび割れ制御用の床版上面鉄筋は、桁軸方向と平行に D22@160 を、それと直交して D19@125 を配置した。

## 2.2 荷重方法と荷重荷重

荷重方法は、連続桁の中間支点部に作用する負の曲げモーメント状態を再現するため、床版部が下になるよう供試体を反転し、供試体中央部に 1 点荷重した (図-2, 写真-1)。

主な荷重ステップの上限荷重を以下に示す。

- 床版のひび割れ発生荷重  $[P=400 \text{ kN}]$
- 許容ひび割れ幅 ( $w_a = 0.0035 \cdot c$ ,  $c$  はかぶり) 相当の荷重  $[P=900 \text{ kN}]$
- 床版鉄筋の許容応力度 ( $\sigma_{sa} = 140 \text{ N/mm}^2$ ) 相当の荷重  $[P=1150 \text{ kN}]$
- 最大荷重荷重  $[P=3700 \text{ kN}]$ : 鋼桁フランジが計算上降伏に達する荷重

ひび割れ発生の安定した状態を再現するため、

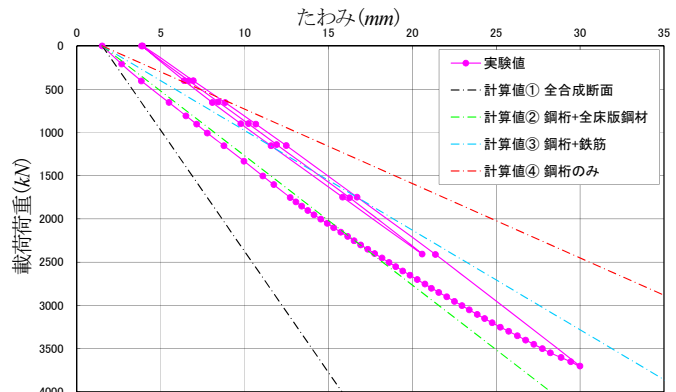


図-3 荷重-中央鉛直たわみ図

表-1 断面の合成状態と断面剛性の比率

| 断面の状態                   | 比率    |
|-------------------------|-------|
| 計算値① 全合成断面              | 3.253 |
| 計算値② 鋼桁+全床版鋼材(鉄筋+ I 形鋼) | 1.738 |
| 計算値③ 鋼桁+鉄筋              | 1.339 |
| 計算値④ 鋼桁のみ               | 1.000 |

荷重荷重は、最大荷重時を除き各荷重ステップあたり 5 サイクル繰り返し荷重し、各部のひずみ及びひび割れ幅等について計測した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 合成桁としての挙動

支間中央の荷重-中央鉛直たわみの関係を図-3 に、図中に示す計算値①~④の合成状態及び断面剛性の比率を表-1 に示す。

また、支間中央付近断面(支間中央より 425mm 離れた位置)のひずみ分布を図-4 に、その断面での荷重荷重による中立軸位置の変化図を図-5 に示す。

これら計測結果より、床版のひび割れ発生後、I 形鋼が降伏点 ( $235 \text{ N/mm}^2$ ) に達する時の荷重  $[P=2400 \text{ kN}]$  までは、荷重-中央鉛直たわみの傾き及び、ひずみ分布の中立軸位置は、床版コン

クリートの引張抵抗を無視した鋼断面の計算値と一致しているのが確認できた。また、本荷重レベルまでは、合成桁断面のひずみ分布は、平面保持の仮定が成立した直線分布であった。

最大荷重【 $P=3700\text{ kN}$ 】時、I形鋼のひずみは、合成桁断面の直線的なひずみ分布より若干小さくなった。これはI形鋼のウェブ孔の影響で、I形鋼が上下T形断面での軸力分布形に変化したため、孔部の曲げ応力分布が乱れたものと推測する。

### 3.2 床版のひび割れ発生状況

許容ひび割れ幅相当の荷重が作用した場合【 $P=900\text{ kN}$ 】の支間中央付近のひび割れ発生状況を図-6に示す。

図中の各ひび割れの横に示した数値は、そのひび割れが発生した時の載荷荷重で何サイクル目かを示している(例:400kN載荷時-2サイクル目  $\Rightarrow$  400-2)。

平均ひび割れ間隔及び平均ひび割れ幅の値は、支間中央より $\pm 800\text{ mm}$ 離れた位置までをひび割れ着目範囲として計測した。着目範囲は、最大曲げモーメントの84%以上の曲げモーメントが作用した範囲に相当し、当範囲の $\pi$ ゲージによるひび割れ幅計測結果は、支間中央での計測結果と同程度であった。

図-6より平均ひび割れ間隔を求めると $256\text{ mm}$ であり、コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>による計算値(以下、“計算値”という)の $317\text{ mm}$ と近い値を示した。

一方、平均ひび割れ幅の計測値は $0.217\text{ mm}$ である。床版上面鉄筋応力度の計測値を用いたコンクリート標準示方書による計算値は $0.201\text{ mm}$ となり、計測値が8%程度大きくなった(表-2)。

この結果より、本床版形式に対して、コンクリート標準示方書の算定式は、比較的精度良くひび割れ間隔及びひび割れ幅が推定できることが確認

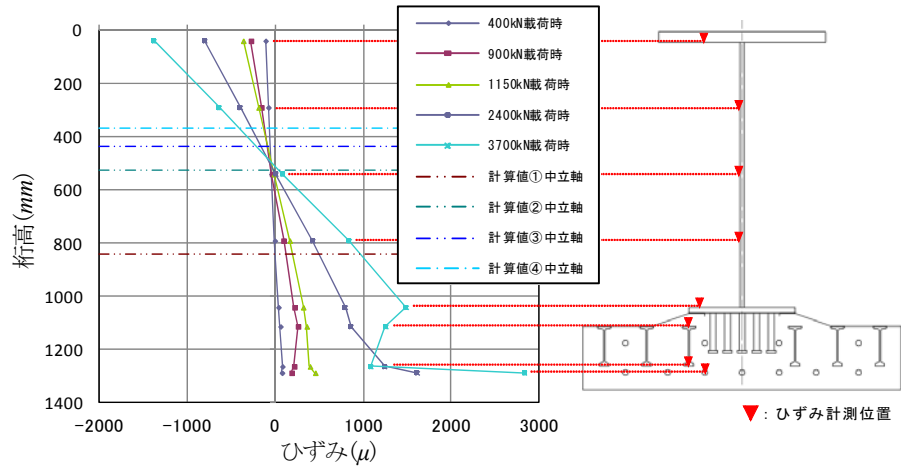


図-4 支間中央付近断面のひずみ分布図(北側)

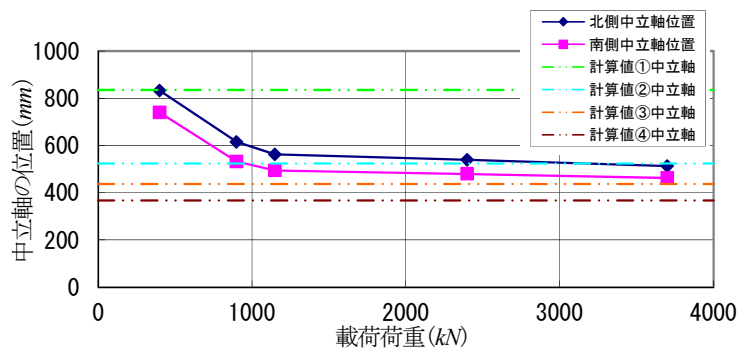


図-5 支間中央付近断面の中立軸位置変化  
(中立軸位置は図-4の桁高の目盛に対応する)

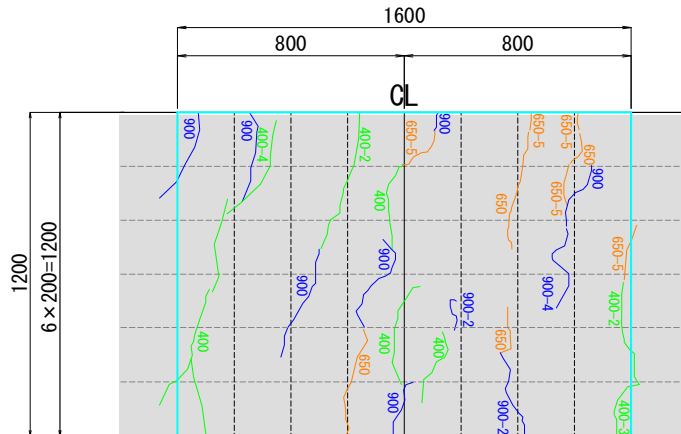


図-6 ひび割れ発生状況図

表-2 ひび割れ幅の比較

|                |                       |
|----------------|-----------------------|
| 床版上面鉄筋応力度【計測値】 | 117 N/mm <sup>2</sup> |
| ①平均ひび割れ幅の計測値   | 0.217 mm              |
| ②ひび割れ幅の計算値     | 0.201 mm              |
| ひび割れ幅の比率 (①/②) | 1.08                  |

※上表の値は、許容ひび割れ幅相当の荷重【 $P=900\text{ kN}$ 】が作用した時の値である。

できた。

#### 4. 他の合成床版等との比較

##### 4.1 ひび割れ間隔の比較

既往の RC 床版・合成床版の負曲げ実験結果と本実験結果の平均ひび割れ間隔と鉄筋比の関係を図-7<sup>1)</sup>に示す。縦置き I 形鋼格子床版は、他の合成床版等と比べて橋軸方向の鋼材量が多く、鉄筋比は 3.6%程度である。I 形鋼と鉄筋との比率は 1.66 : 1.0 で I 形鋼の鋼材量が多くなっている。

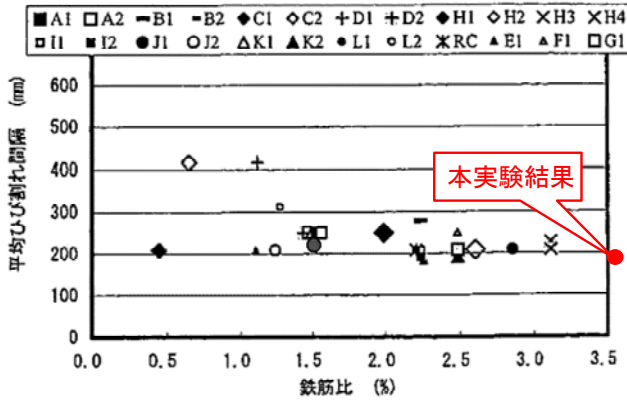


図-7 ひび割れ間隔の比較

( $\sigma_s = 140 \text{ N/mm}^2$  相当)

床版鉄筋の許容応力度 ( $\sigma_{sa} = 140 \text{ N/mm}^2$ ) 相当の荷重が作用した場合【 $P=1150 \text{ kN}$ 】のひび割れ間隔は 190 mm であり、他の合成床版等よりもひび割れ間隔は小さくなった。これは、鋼材量の多い本床版では、コンクリートのひび割れに対する拘束効果が高いため、ひび割れ間隔が小さくなったものと推測する。

##### 4.2 ひび割れ幅の比較

床版鉄筋の許容応力度相当の荷重が作用した場合のひび割れ幅について、他の合成床版等と比較すると図-8<sup>1)</sup>になる。縦置き I 形鋼格子床版のひび割れ幅は 0.266 mm で、他の合成床版等の実験結果より、若干大きめの値となった。

合成床版設計・施工マニュアル<sup>5)</sup>に、床版上面の鉄筋応力度を  $120 \text{ N/mm}^2$  以下に抑えると、ひび割れ幅は耐久性上問題とならない幅の 0.2 mm 程度以下に抑えることができることが示されている。その結果を示した図-9<sup>5)</sup>に本実験結果の許容ひび割れ幅相当の荷重【 $P=900 \text{ kN}$ 】が作用した場合の計測結果 0.217 mm をプロットし比較する。その結果、縦置き I 形鋼格子床版は、他の合成床版のひび割れ幅と顕著な差はないことが確認できた。

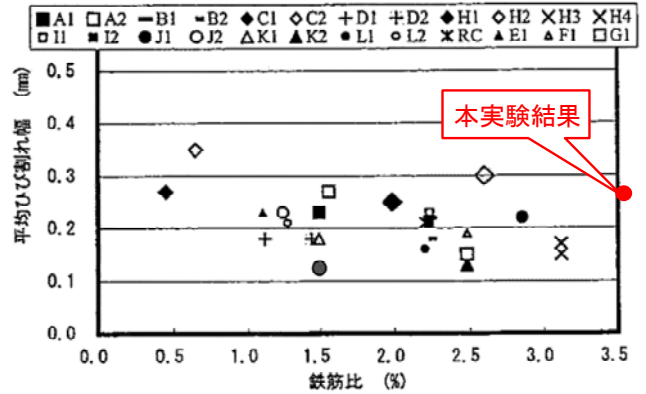


図-8 ひび割れ幅の比較

( $\sigma_s = 140 \text{ N/mm}^2$  相当)

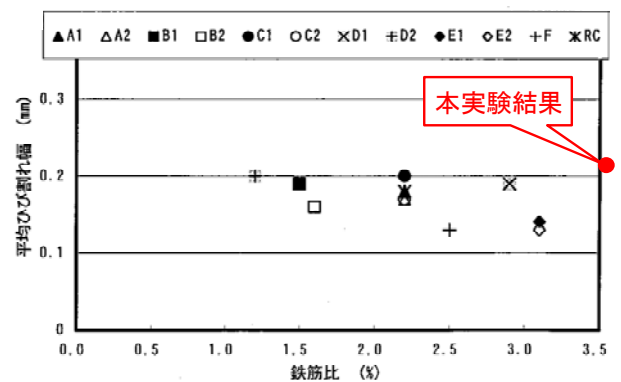


図-9 ひび割れ幅の比較

( $\sigma_s = 120 \text{ N/mm}^2$  相当)

#### 5. ひび割れ幅照査法

##### 5.1 ひび割れ幅照査方針

縦置き I 形鋼格子床版の合成桁中間支点上のひび割れ幅は、実験値とコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>の計算値が比較的精度良く一致しているため、コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式を用いてひび割れ幅の照査を行うことができる。算定式は、最外縁鉄筋の引張応力度を基にひび割れ幅を算定するため、ひび割れ幅の許容値に相当する応力度（以下、“限界応力度”）以下に鉄筋の引張応力度を抑えることでひび割れ幅を制御する。

また、縦置き I 形鋼格子床版の場合には底鋼板があることから、床版上面のひび割れ幅についてのみ照査する。床版下面に対しては、現行の道路橋示方書に基づき、主桁作用と床版作用を組み合わせた荷重に対して、床版下縁の鉄筋応力度が許容値を 20 % 割り増しした値以下であることを照査する。

## 5.2 照査基本式

縦置き I 形鋼格子床版のひび割れ幅の照査に用いるコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>の算定式を下式に示す。

$$w = 1.1 \cdot k_1 k_2 k_3 [4c + 0.7(c_s - \phi)] \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \dots (1)$$

ここに、

- $k_1$  : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数
- $k_2$  : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数
- $k_3$  : 引張鋼材の段数の影響を表す係数
- $c$  : かぶり (mm)
- $c_s$  : 鋼材の中心間隔 (mm)
- $\phi$  : 鋼材径 (mm)
- $\sigma_{se}$  : 鉄筋応力度増加量 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\varepsilon'_{csd}$  : コンクリートの収縮及びクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

式(1)の鉄筋応力度の増加量  $\sigma_{se}$  を、コンクリートの引張抵抗特性を考慮して表すと下式となる。

$$\sigma_{se} = \sigma_s - \beta \cdot \frac{f_{tk}}{\rho_s} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{st}} \right) \quad (2)$$

ここに、

- $\beta$  : 付着パラメータ
- $f_{tk}$  : コンクリートの有効引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\rho_s$  : 鉄筋比
- $\alpha_{st} = (A_{st} \cdot I_{st}) / (A_g \cdot I_g)$

ここに、

- $A_g, I_g$  : 鋼桁の断面二次モーメントと断面積
- $A_{st}, I_{st}$  : [ 鋼桁 + I 形鋼 + 鉄筋 ] の断面二次モーメントと断面積

NEXCO 仕様の PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計では、ひび割れ幅の照査において、上記(2)式のコンクリートの引張抵抗特性を考慮した中菌ら<sup>6)</sup>のひび割れ幅の推定式が用いられている。本実験でも計測値と比較したひび割れ幅の計算値は(2)式を加味しており、コンクリートの引張抵抗特性を考慮した値が計測値と良い一致を示すことから、本床版のひび割れ幅制御設計の基本式は、(1)式と(2)式を考慮した下式とする。

$$w = 1.1 \cdot k_1 k_2 k_3 [4c + 0.7(c_s - \phi)]$$

$$\cdot \left( \left[ \sigma_s - \beta \frac{f_{tk}}{\rho_s} \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{st}} \right) \right] / E_s + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (3)$$

(3)式中の  $\alpha_{st}$  には、I 形鋼の断面積及び断面二次モーメントを含んでいる。また、(3)式中の  $\sigma_s$  は、床版上面引張鉄筋の応力度であるが、鉄筋応力度算出時は、I 形鋼を合成桁の抵抗体の一部として考慮している。従って、本照査基本式は、I 形鋼の影響を十分に加味したものとなっている。

## 5.3 許容ひび割れ幅

許容ひび割れ幅は、防水層等の床版内部への止水技術の向上及び、各現場に即した腐食に対する環境条件を設定し決定する必要がある。しかし、床版は繰り返し荷重を受ける過酷な荷重条件下にあることから、許容ひび割れ幅は、“特に厳しい腐食性環境”に相当する値を用いる。

$$w_a = 0.0035 \cdot c = 0.0035 \times 55 \text{ mm} = 0.1925 \text{ mm}$$

これにより、許容ひび割れ幅は耐久性上問題とされない幅の 0.2 mm 程度に抑えることができる。

## 5.4 ひび割れ幅照査時の荷重の組合せ

NEXCO 仕様の PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計では、PC 床版の床版支間が橋軸直角方向であることから、ひび割れ幅の照査荷重は主桁作用の L 荷重の 60%のみを考慮し、T 荷重による L 荷重と同方向のひび割れ幅への影響は小さいものとして、これを省略している。また、床版と主桁の温度差の影響も考慮されていない。

縦置き I 形鋼格子床版は床版支間が橋軸方向である。床版作用の主たる方向は、L 荷重と同方向であることから、T 荷重によるひび割れ幅への影響は大きい。従って、本床版のひび割れ幅の照査は、L 荷重と T 荷重を重ね合わせて行う必要がある。また、歩道を有する一般道への適用も考慮する。これらの点から荷重の組合わせ係数は、橋軸方向が床版支間となる場合も想定され、群衆荷重との組合せも考慮されている DIN の基準<sup>7)</sup>を参考に、表-3 のように設定する。

この結果、L 荷重に対する係数が 75%と NEXCO 基準の 60%よりも大きめの設定となり、ひび割れ幅の照査を安全側に行うことができる。

表-3 荷重の組合せ係数

| 荷重種別  | 主桁作用 |      |      |      |          |                  |      | 床版作用 |
|-------|------|------|------|------|----------|------------------|------|------|
|       | 死荷重  | L荷重  | 群集荷重 | 雪荷重  | クリ<br>ープ | 乾<br>燥<br>収<br>縮 | 温度差  | T荷重  |
| 組合せ係数 | 1.00 | 0.75 | 0.40 | 0.00 | 1.00     | 1.00             | 0.50 | 1.00 |

5.5 ひび割れ幅の許容値に相当する鉄筋の限界応力度  $\sigma_a$

(3)式のひび割れ幅  $w$  に“特に厳しい腐食性環境”の許容ひび割れ幅  $w_a$  の条件式を適用し、鉄筋の限界応力度  $\sigma_a$  の算出式に書き替えると以下となる。

$$\sigma_a = 0.0035c \cdot E_s / \left( 1.1 \cdot k_1 k_2 k_3 \cdot \left[ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right] \right) + \beta \cdot \frac{f_{tk}}{\rho_s} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{st}} \right) - E_s \cdot \varepsilon'_{csd} \quad (4)$$

上式を用い、本供試体の桁断面で、床版コンクリートの設計基準強度  $\sigma_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$  とした時の鉄筋の限界応力度は  $\sigma_a = 109.3 \text{ N/mm}^2$  である。他の合成床版の実験結果で、耐久性上問題とならないひび割れ幅相当の鉄筋応力度は  $\sigma_s = 120 \text{ N/mm}^2$  程度であり、本床版の鉄筋の限界応力度はこの値より 10 %程度低く許容値を設定することとなる。

6. まとめ

縦置き I 形鋼格子床版と他の合成床版とのひび割れ挙動を比較した結果、前者の方がひび割れ間隔は小さいが、ひび割れ幅は同程度であった。これは、橋軸方向の鋼材量が多い本床版の方が、ひび割れに対する拘束効果は高いが、I 形鋼の付着性能が異形鉄筋に比べ劣るため、ひび割れ幅はひび割れ間隔程小さくならなかったものと推察する。

本床版のひび割れ幅は、RC 床版を基本に設定されたコンクリート標準示方書の算定式で比較的精度良く推定できることが判った。また、合成桁としての挙動は、I 形鋼が降伏点に達するまでは平面保持の仮定が成立しており、本床版が連続合成桁として有効に機能していることが確認できた。

実験結果を踏まえ、NEXCO 仕様の PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋のひび割れ幅制御設計法及び、T 荷重と歩道部の群集荷重も考慮した DIN 規定の照査荷重組合せ係数を参考に、縦置き I 形鋼格子床版のひび割れ幅制御設計法を示した。照

査時の L 荷重は、従来の 60 %から 75 %に引き上げて照査することを提案する。

提案した許容ひび割れ幅に相当する鉄筋の限界応力度は、他の合成床版で耐久性上問題とならないひび割れ幅相当の鉄筋応力度 ( $\sigma_s = 120 \text{ N/mm}^2$  程度) よりも、10 %程度許容値を低く設定することになる。これらにより、縦置き I 形鋼格子床版のひび割れ幅を制御した設計が十分に行えるものと考ええる。

・謝辞

本実験は、大阪工業大学・八幡工学実験場の 10,000kN フレームを使用して行ったが、実験に際しては多数の技術者の協力を得たことを記し、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 村山隆之, 吉崎信之, 西川和廣, 八部順一, 橘吉宏, 大垣賀津雄, 済藤英明: 合成床版を有する合成桁の中間支点部負曲げ実験, 土木学会第 56 回年次講演会, 2001. 10
- 2) 中本啓介, 長井正嗣, 奥井義昭, 岩崎英治, 細見雅生: 負曲げを受ける合成桁のひび割れ挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol. 49A, 2003. 3
- 3) 神谷崇, 谷口望, 碓山晴久, 依田照彦: 繰り返し荷重を受ける連続合成桁中間支点部のひび割れ挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 1, 2007
- 4) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書 2007 年制定 設計編, 2007. 10
- 5) 日本橋梁建設協会: 合成床版設計・施工マニュアル, 2003. 2
- 6) 中菌明広, 橘吉宏, 安川義行, 秋山洋, 稲葉尚文, 佐々木保隆: PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法 (上), 橋梁と基礎, 2002. 2
- 7) DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken, 2. Auflage 2003